

## Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Οι εξισώσεις του Maxwell αποτελούν τη θεωρητική βάση για όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός.

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα παράγονται από την ταλάντωση ηλεκτρικών φορτίων (από επιταχυνόμενα φορτία).

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα φέρουν ενέργεια και ορμή.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

# James Clerk Maxwell

1831–1879

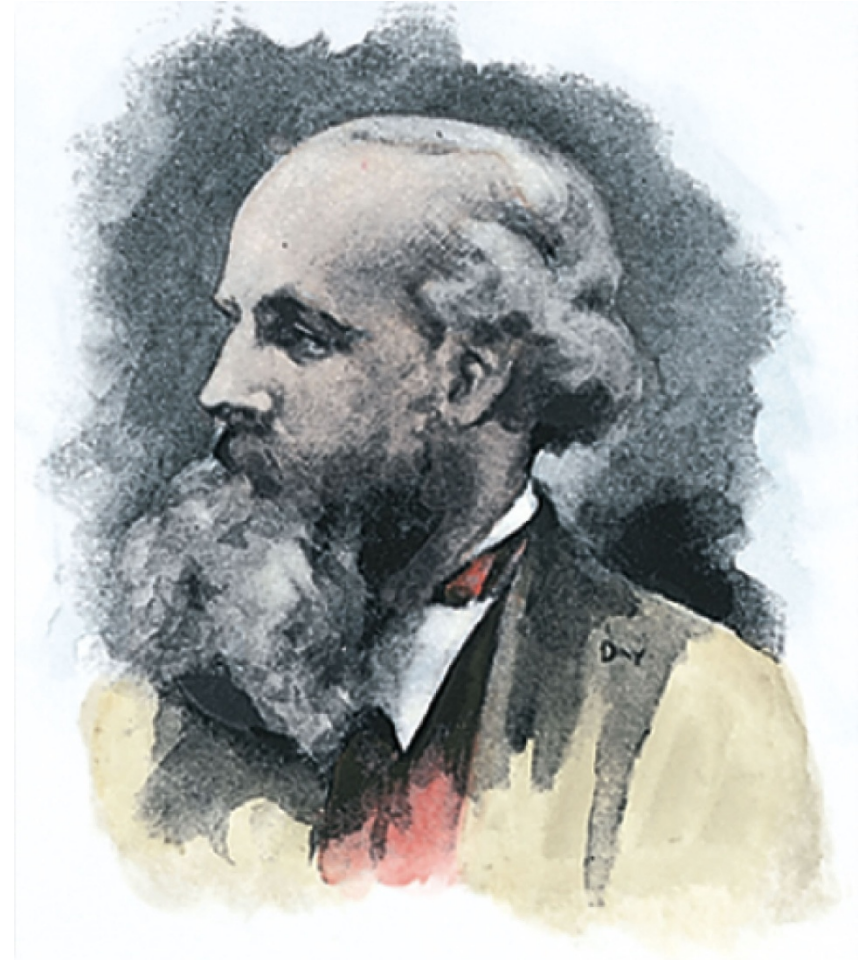
Σκωτσέζος θεωρητικός φυσικός.

Ανέπτυξε την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του φωτός.

Η επιτυχημένη ερμηνεία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τον Maxwell οδήγησε στις εξισώσεις πεδίου που φέρουν το όνομά του.

Επίσης ανέπτυξε και εξήγησε:

- την κινητική θεωρία των αερίων,
- τη φύση των δακτυλίων του Κρόνου,
- τον τρόπο διάκρισης των χρωμάτων από το μάτι.



## Η πρώτη εξίσωση του Maxwell – Ο νόμος του Gauss

Η συνολική ηλεκτρική ροή που διέρχεται από οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια ισούται με το συνολικό φορτίο που περικλείει η επιφάνεια διά του  $\epsilon_0$ :

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Ο νόμος αυτός συσχετίζει το ηλεκτρικό πεδίο με την κατανομή φορτίου που το δημιουργεί.

## Η δεύτερη εξίσωση του Maxwell – Ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό

Η συνολική μαγνητική ροή που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια είναι μηδενική.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Το πλήθος των γραμμών μαγνητικού πεδίου που εισέρχονται σ' έναν κλειστό όγκο πρέπει να είναι ίσο με το πλήθος των γραμμών που εξέρχονται απ' αυτόν. Αν δεν ίσχυε αυτό, τότε θα υπήρχαν στη φύση μαγνητικά μονόπολα (δεν έχουν ανακαλυφθεί μαγνητικά μονόπολα).

## Η τρίτη εξίσωση του Maxwell – Ο νόμος του Faraday για την επαγωγή

Περιγράφει τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου από χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Απόρροια του νόμου του Faraday για την επαγωγή είναι το ρεύμα που επάγεται σε αγωγίμο βρόχο μέσα σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

## Η τέταρτη εξίσωση του Maxwell – Ο νόμος Ampère-Maxwell

Για την ανάλυση μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από ηλεκτρικά ρεύματα χρησιμοποιούμε τον νόμο του Ampère, ο οποίος ισχύει μόνο αν τα ηλεκτρικά πεδία είναι σταθερά ως προς τον χρόνο. Ο Maxwell τροποποίησε την εξίσωση, προσθέτοντας έναν όρο, ώστε να καλύπτει και χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία. Ο πρόσθετος όρος περιλαμβάνει έναν παράγοντα, ο οποίος ονομάζεται **ρεύμα μετατόπισης**,  $I_d$ :

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Περιγράφει τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου από ηλεκτρικό ρεύμα και μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

## Ο νόμος της δύναμης Lorentz

Όταν είναι γνωστές οι τιμές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου σε κάποιο σημείο του χώρου, η δύναμη που δέχεται ένα σωματίδιο με φορτίο  $q$  και ταχύτητας  $u$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{u} \times \vec{B}$$

**Οι εξισώσεις του Maxwell, σε συνδυασμό με τον νόμο της δύναμης Lorentz, περιγράφουν πλήρως όλες τις κλασικές ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν στο κενό.**

## Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Εφαρμόζοντας τις 2 τελευταίες εξισώσεις του Maxwell στην περίπτωση δημιουργίας μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στο κενό (όπου  $q=0$  και  $I=0$ ), παίρνουμε τις παρακάτω μερικές διαφορικές εξισώσεις:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad \text{και} \quad \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

Αυτές έχουν τη μορφή μιας γενικής κυματικής εξίσωσης. Η πιο απλή λύση που ικανοποιεί αυτές τις μερικές διαφορικές εξισώσεις είναι το ημιτονοειδές κύμα:

$$E = E_{\max} \cos(kx - \omega t) \quad \text{και} \quad B = B_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

Ο κυκλικός κυματαριθμός είναι  $k = 2\pi/\lambda$  (όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος) και η κυκλική συχνότητα είναι  $\omega = 2\pi f$  (όπου  $f$  είναι η συχνότητα του κύματος).

Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος είναι ίση με:  $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των  $\mu_0$  και  $\epsilon_0$  βρίσκουμε ότι η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι ίση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό,  $c = 2.99792 \times 10^8$  m/s.

Αυτό το αποτέλεσμα οδήγησε τον Maxwell στην πρόβλεψη ότι τα κύματα φωτός είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου και το μέτρο του μαγνητικού πεδίου στο κενό συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$c = E/B$$

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υπόκεινται στην αρχή της υπέρθεσης.

## Heinrich Rudolf Hertz

1857–1894

Γερμανός φυσικός

Ήταν ο πρώτος που παρήγαγε και ανίχνευσε ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε εργαστηριακό περιβάλλον (1887).

Έδειξε επίσης και άλλες κυματικές ιδιότητες του φωτός.

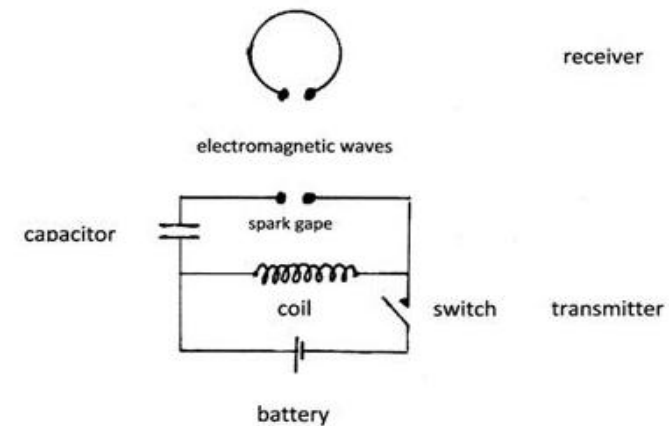




## Το πείραμα του Hertz (1886)

<http://www.juliantrubin.com/bigten/hertzexperiment.html>

**Ο πομπός:** “For his **radio wave transmitter** he used a *high voltage induction coil*, a *capacitor*, and a *spark gap*, whose poles on either side are formed by spheres of 2 cm radius. He caused a spark discharge between the spark gap’s poles oscillating at a frequency determined by the values of the capacitor and the induction coil. This first radio waves transmitter is basically, what we call today, an LC oscillator”.



To prove there really was electromagnetic wave emitted, it had to be detected.

**Ο δέκτης:** A piece of copper wire, 1 mm thick, bent into a circle of a diameter of 7.5 cm, with a small brass sphere on one end. The other end of the wire was pointed, with the point near the sphere. ... screw mechanism so that the point could be moved very close to the sphere in a controlled fashion.

... Current oscillating back and forth in the wire would have a natural period close to that of the "transmitter". The presence of oscillating charge in the receiver was signaled by sparks across the (tiny) gap between the point and the sphere (typically, this gap was hundredths of a millimeter).

## Το πείραμα του Hertz (συνέχεια)

Με μια σειρά άλλων πειραμάτων, ο Hertz έδειξε επίσης ότι η ακτινοβολία που παρήγαγε αυτή η διάταξη παρουσίαζε κυματικές ιδιότητες: Συμβολή, περίθλαση, ανάκλαση, διάθλαση, και πόλωση.

Επιπλέον μέτρησε την ταχύτητα διάδοσης αυτής της ακτινοβολίας: Η ταχύτητα αυτή ήταν πολύ κοντά στη γνωστή τιμή της ταχύτητας του φωτός.

## Κύματα

Ο όρος *κύμα* αναφέρεται

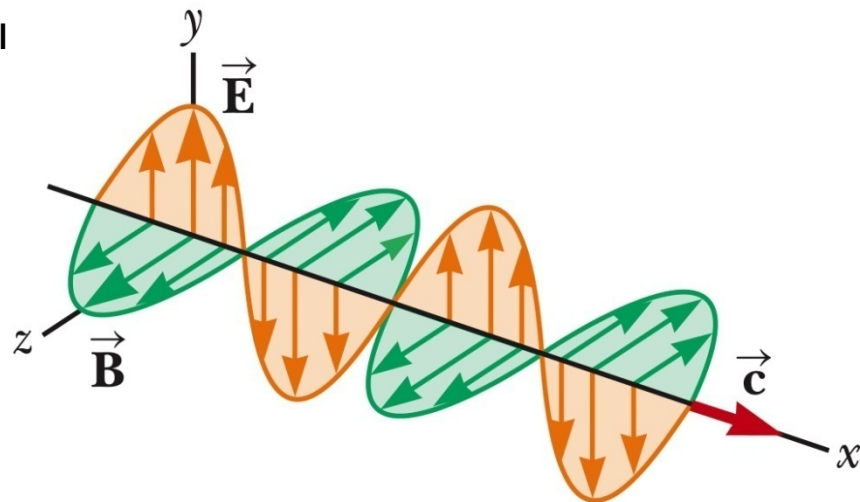
- τόσο στην εκπομπή από ένα *μεμονωμένο σημείο*
- όσο και στο σύνολο των κυμάτων που εκπέμπουν *όλα τα σημεία της πηγής*.

Η σημασία του όρου γίνεται αντιληπτή από τα συμφραζόμενα.

## Επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Έστω ηλεκτρομαγνητικό κύμα που διαδίδεται προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα  $x$ .

Σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου, τα μέτρα των διανυσμάτων  $E$  και  $B$  των πεδίων εξαρτώνται μόνο από τη συντεταγμένη  $x$  και τον χρόνο  $t$  (σύμφωνα με τις εξισώσεις του Maxwell).



Οι συνιστώσες που αντιστοιχούν στο ηλεκτρικό και στο μαγνητικό πεδίο των επίπεδων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι κάθετες μεταξύ τους και κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια κύματα).

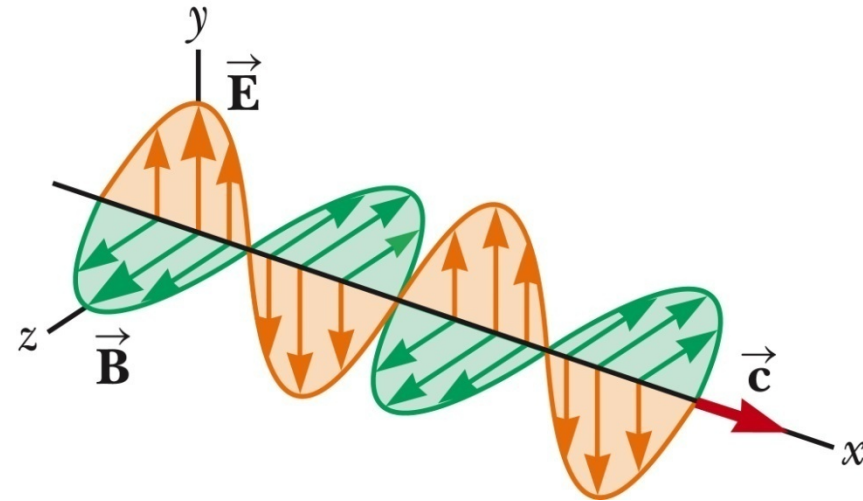
Κύματα (το σύνολο των κυμάτων που εκπέμπουν όλα τα σημεία της πηγής) στα οποία το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι παράλληλα προς σταθερούς άξονες κάθετους μεταξύ τους λέγονται **γραμμικώς πολωμένα κύματα**.

**Ακτίνα** είναι η ευθεία κατά μήκος της οποίας διαδίδεται το κύμα.

Όλες οι ακτίνες των γραμμικά πολωμένων κυμάτων είναι παράλληλες.

Το σύνολο αυτών των κυμάτων ονομάζεται **επίπεδο κύμα**.

Η επιφάνεια που συνδέει τα σημεία ίσης φάσης όλων των κυμάτων είναι ένα γεωμετρικό επίπεδο, το οποίο ονομάζεται **μέτωπο κύματος**.



Σημειακή πηγή ακτινοβολίας εκπέμπει κύματα ακτινικά προς όλες τις κατευθύνσεις. Σε αυτή την περίπτωση, η επιφάνεια που συνδέει τα σημεία ίσης φάσης είναι σφαιρική.

Αυτό το κύμα ονομάζεται **σφαιρικό κύμα**.

## Το δiάνυσμα Poynting

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια. Κατά τη διάδοσή τους στον χώρο, μπορούν να μεταφέρουν αυτή την ενέργεια στα σώματα στα οποία προσπίπτουν.

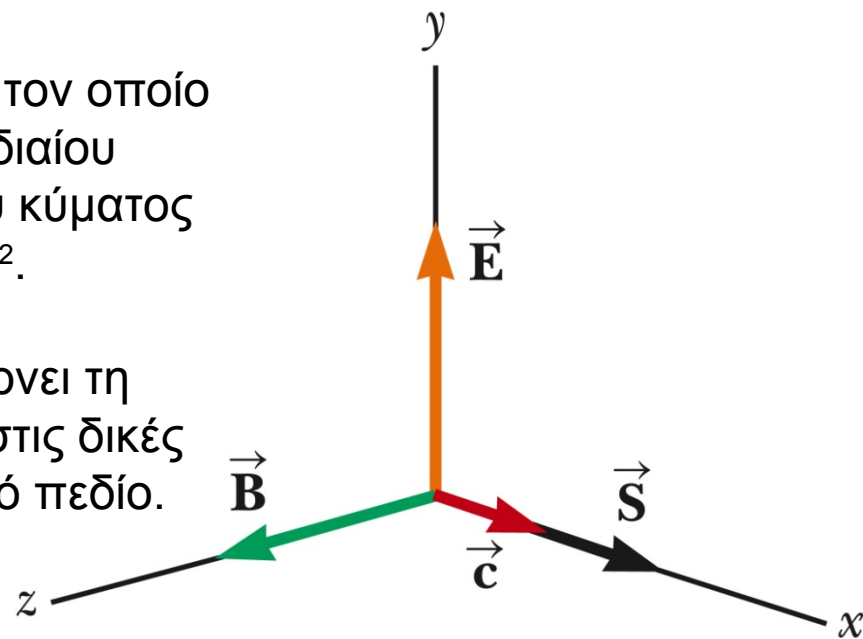
Ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας από ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα περιγράφεται με το δiάνυσμα  $\vec{S}$ , το οποίο ονομάζεται **δiάνυσμα Poynting**.

$$\vec{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

Η κατεύθυνσή του είναι ίδια με την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Το μέτρο του αντιπροσωπεύει τον ρυθμό με τον οποίο η ενέργεια διέρχεται από μια επιφάνεια μοναδιαίου εμβαδού κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας). Μονάδα:  $\text{W}/\text{m}^2$ .

Το μέτρο του μεταβάλλεται με τον χρόνο. Παίρνει τη μέγιστη τιμή του τότε ακριβώς που φτάνουν στις δικές τους μέγιστες τιμές το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο.



## Ένταση κύματος

Η **ένταση**,  $I$ , του κύματος είναι η μέση τιμή του διανύσματος Poynting,  $S$ , για μία ή περισσότερες περιόδους (ή κύκλους).

Όταν υπολογίζουμε τον μέσο όρο, λαμβάνουμε υπόψη τη χρονική μέση τιμή του  $\cos^2(kx - \omega t) = 1/2$ , οπότε:

$$I \equiv S_{\text{μέσο}} = \frac{E_{\text{max}} B_{\text{max}}}{2\mu_0} = \frac{E_{\text{max}}^2}{2\mu_0 c} = \frac{cB_{\text{max}}^2}{2\mu_0}$$

## Πυκνότητα ενέργειας

Η **πυκνότητα ενέργειας**,  $u$ , είναι η ενέργεια ανά μονάδα όγκου.

Για το ηλεκτρικό πεδίο,  $u_E = 1/2 \epsilon_0 E^2$ . Για το μαγνητικό πεδίο,  $u_B = 1/2 \mu_0 B^2$ . Επειδή  $B = E/c$  και  $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ , ισχύει ότι:

$$u_B = u_E = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$$

Η στιγμιαία πυκνότητα ενέργειας του μαγνητικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ισούται με τη στιγμιαία πυκνότητα ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος. Σε οποιονδήποτε δεδομένο όγκο, η ενέργεια είναι μοιρασμένη εξίσου σε καθένα από τα δύο πεδία.

## Πυκνότητα ενέργειας (συνέχεια)

Η **συνολική στιγμιαία πυκνότητα ενέργειας**,  $u$ , ισούται με το άθροισμα των πυκνοτήτων ενέργειας του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου:

- $u = u_E + u_B = \epsilon_0 E^2 = B^2/\mu_0$

Αν θεωρήσουμε τον μέσο όρο της συνολικής στιγμιαίας πυκνότητας ενέργειας για έναν ή περισσότερους κύκλους, τότε η συνολική μέση τιμή γίνεται:

- $u_{\text{μέση}} = \epsilon_0 (E^2)_{\text{μέση}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_{\text{max}}^2 = B_{\text{max}}^2/2\mu_0$

Συναρτήσει της έντασης,  $I = S_{\text{μέση}} = cu_{\text{μέση}}$ .

- Η ένταση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ισούται με το γινόμενο της μέσης πυκνότητας ενέργειας επί την ταχύτητα του φωτός.

## Ορμή

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν μεταφέρουν μόνο ενέργεια αλλά και ορμή.

Όταν κάποια επιφάνεια απορροφά αυτή την ορμή υφίσταται πίεση.

Αν υποθέσουμε ότι το κύμα μεταφέρει στην επιφάνεια συνολική ενέργεια  $T_{HA}$  σε χρονικό διάστημα  $\Delta t$  τότε, στην περίπτωση πλήρους απορρόφησης, η συνολική ορμή που μεταφέρεται στην επιφάνεια είναι  $p = T_{HA}/c$ .

## Πίεση

Για μια πλήρως απορροφητική επιφάνεια  $p = T_{HA}/c$  και  $P = S/c$ .

Για μια πλήρως ανακλαστική επιφάνεια,  $p = 2T_{HA}/c$  και  $P = 2S/c$ .

Η πίεση που δέχεται μια επιφάνεια με ανακλαστική ικανότητα κάπου μεταξύ εκείνης ενός πλήρως απορροφητικού σώματος και εκείνης ενός πλήρως ανακλαστικού σώματος έχει τιμή μεταξύ  $S/c$  και  $2S/c$ .



## Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από κεραίες

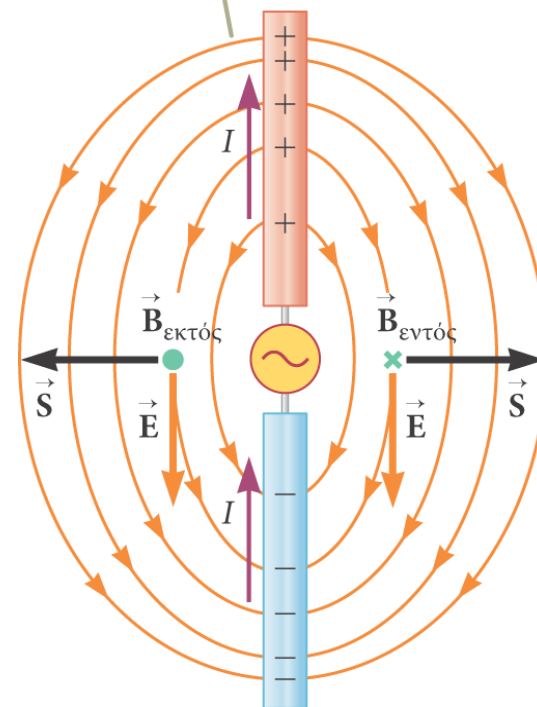
Τα ακίνητα ηλεκτρικά φορτία και τα σταθερά ηλεκτρικά ρεύματα δεν παράγουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Ο θεμελιώδης μηχανισμός για την παραγωγή αυτής της ακτινοβολίας είναι η επιτάχυνση των φορτισμένων σωματιδίων. Όποτε επιταχύνεται ένα φορτισμένο σωματίδιο, ακτινοβολεί ενέργεια.

Δύο αγώγιμες ράβδοι που συνδέονται με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης είναι μία *διπολική κεραία μισού μήκους κύματος*.

Μία τέτοια διάταξη εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το μήκος κάθε ράβδου ισούται με το ένα τέταρτο του μήκους κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου μοιάζουν με εκείνες του ηλεκτρικού διπόλου (το οποίο φαίνεται στην Εικ. Η1.20).



## Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από κεραίες

Ο ταλαντωτής αναγκάζει τα φορτία να επιταχύνονται πότε προς τη μία και πότε προς την άλλη κατεύθυνση μεταξύ των δύο ράβδων. Μπορούμε να θεωρήσουμε την κεραία ως ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο.

Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου σχηματίζουν ομόκεντρους κύκλους γύρω από την κεραία, κάθετους στις γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο.

Η πηγή της ακτινοβολίας σε ένα σημείο μακριά από την κεραία είναι η διαρκής επαγωγή ηλεκτρικού πεδίου από το χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και η επαγωγή μαγνητικού πεδίου από το χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Το ηλεκτρικό πεδίο και το μαγνητικό πεδίο που παράγονται με αυτό τον τρόπο είναι σε φάση μεταξύ τους και μεταβάλλονται σύμφωνα με τον παράγοντα  $1/r$ .

Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχει πάντα ροή ενέργειας από την κεραία προς τα έξω αλλά ενέργεια του διπόλου μειώνεται γρήγορα καθώς απομακρυνόμαστε από την κεραία (σύμφωνα με τον παράγοντα  $1/r^2$ ).

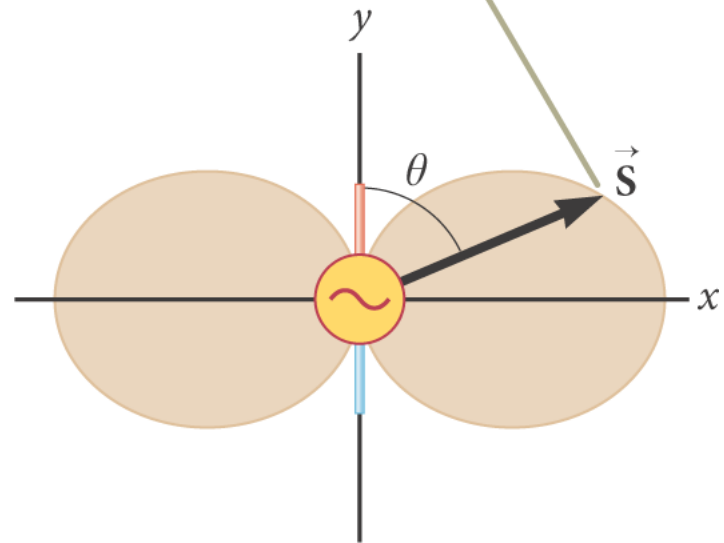
## Εξάρτηση της έντασης από τη γωνία

Σε αυτή την εικόνα φαίνεται η εξάρτηση της έντασης της ακτινοβολίας που παράγει μια διπολική κεραία από τη γωνία.

Η ένταση και η ισχύς της ακτινοβολίας είναι μέγιστες στο επίπεδο που είναι κάθετο στην κεραία και διέρχεται από το μέσο της.

Η ένταση μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση  $(\sin^2\theta)/r^2$ .

Η απόσταση από την αρχή των αξόνων σε ένα σημείο που βρίσκεται στο άκρο της σκιασμένης περιοχής είναι ανάλογη του μέτρου του διανύσματος Poynting και της έντασης της ακτινοβολίας σε αυτή την κατεύθυνση.



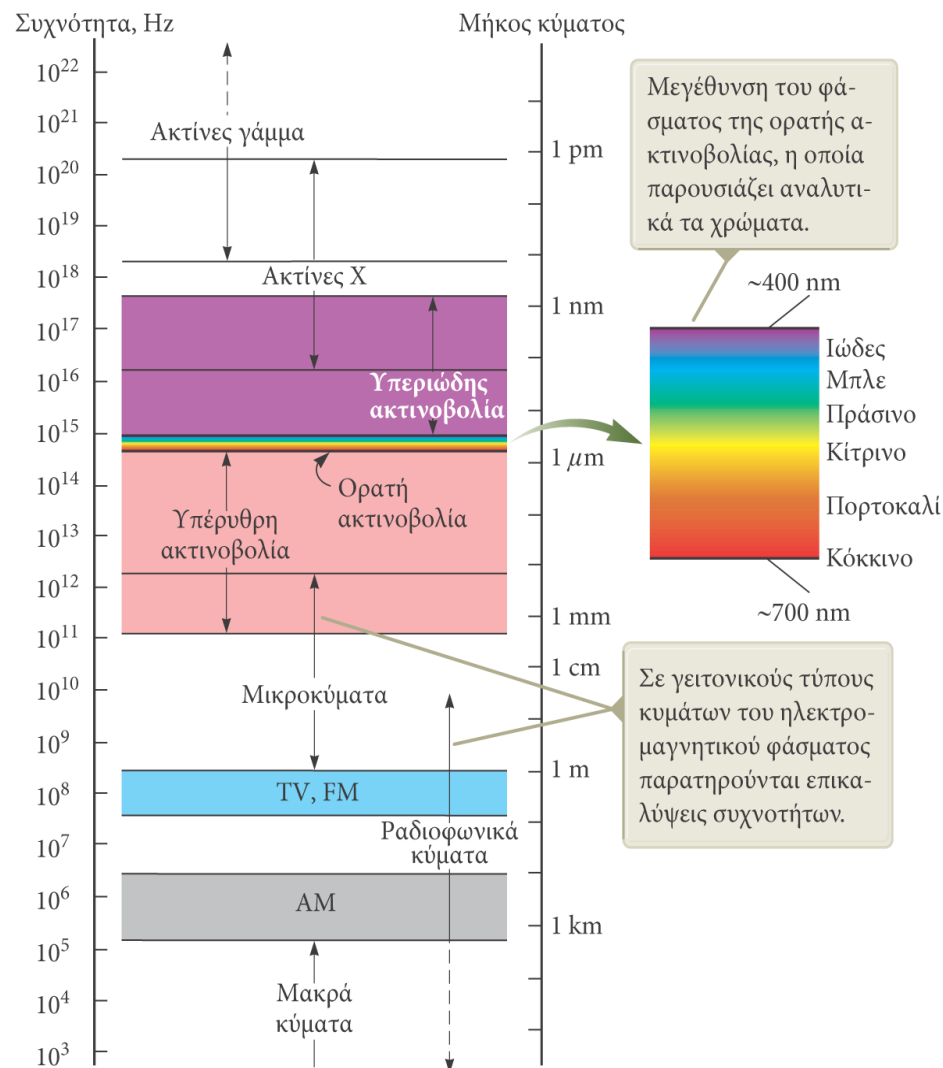
# Το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αποτελείται από διάφορους “τύπους” ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (διακρίνονται βάσει της συχνότητας ή του μήκους κύματος):

Ακτίνες  $\gamma$ , Χ, Υπεριώδης ακτινοβολία, ορατή ακτινοβολία, Υπέρυθρη ακτινοβολία, Μικροκύματα, Ραδιοφωνικά κύματα.

Όλες οι μορφές των διαφόρων “τύπων” ακτινοβολίας παράγονται από το ίδιο φαινόμενο: την επιτάχυνση ηλεκτρικών φορτίων.

Το ορατό φως αποτελεί ένα μικρό τμήμα του φάσματος.



## Επισημάνσεις σχετικά με το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

**Ραδιοφωνικά κύματα ή ραδιοκύματα:** Έχουν μήκος κύματος από  $10^4$  m έως περίπου 0.1 m. Χρησιμοποιούνται σε ραδιοφωνικά και τηλεοπτικά συστήματα επικοινωνίας.

**Μικροκύματα:** Έχουν μήκος κύματος από περίπου 0.1 m έως  $10^{-4}$  m. Είναι κατάλληλα για συστήματα ραδιοεντοπισμού (ραντάρ). Χρησιμοποιούνται, μεταξύ άλλων, στους φούρνους μικροκυμάτων.

**Υπέρυθρα κύματα:** Έχουν μήκος κύματος από περίπου  $10^{-3}$  m έως  $7 \times 10^{-7}$  m. Παράγονται από θερμά σώματα και μόρια. Απορροφώνται άμεσα από τα περισσότερα υλικά.

**Ορατή ακτινοβολία (φως):** Το τμήμα του φάσματος που γίνεται αισθητό από το ανθρώπινο μάτι. Η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού είναι μέγιστη σε μήκος κύματος περίπου  $5.5 \times 10^{-7}$  m (κιτρινοπράσινο χρώμα).

**Υπεριώδες φως:** Έχει μήκος κύματος από περίπου  $4 \times 10^{-7} \text{ m}$  έως  $6 \times 10^{-10} \text{ m}$ . Ο Ήλιος είναι μια σημαντική πηγή υπεριώδους φωτός. Το μεγαλύτερο μέρος του υπεριώδους φωτός απορροφάται στη στρατόσφαιρα από το όζον.

**Ακτίνες Χ:** Έχουν μήκος κύματος από περίπου  $10^{-8} \text{ m}$  έως  $10^{-12} \text{ m}$ . Συνήθως παράγονται από επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας, τα οποία προσπίπτουν σε έναν μεταλλικό στόχο. Χρησιμοποιούνται ως ιατρικό διαγνωστικό μέσο.

**Ακτίνες γάμμα:** Έχουν μήκος κύματος από περίπου  $10^{-10} \text{ m}$  έως  $10^{-14} \text{ m}$ . Εκπέμπονται από ραδιενεργούς πυρήνες. Είναι εξαιρετικά διεισδυτικές και προκαλούν σοβαρές βλάβες όταν απορροφώνται από τους ιστούς έμβιων οργανισμών.

Η εξέταση του φωτός που αντιστοιχεί σε διαφορετικά τμήματα του φάσματος μπορεί να δώσει διαφορετικές πληροφορίες για ένα σώμα.

## Περισσότερα σχετικά με το ορατό φως

Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό μήκος κύματος.

Το εύρος των μηκών κύματος του ορατού φωτός είναι από  $\lambda \sim 7 \times 10^{-7} \text{ m}$  (κόκκινο) έως  $\lambda \sim 4 \times 10^{-7} \text{ m}$  (ιώδες).

### ΠΙΝΑΚΑΣ Η12.1

Προσεγγιστική αντιστοιχία μηκών κύματος του ορατού φάσματος και των χρωμάτων

Μήκος κύματος Εύρος (nm)	Χρώμα Περιγραφή
400–430	Ιώδες
430–485	Κυανό
485–560	Πράσινο
560–590	Κίτρινο
590–625	Πορτοκαλί
625–700	Κόκκινο

Σημείωση: Το εύρος μηκών κύματος που δίνεται για κάθε χρώμα είναι προσεγγιστικό. Κάθε άνθρωπος αντιλαμβάνεται τα χρώματα διαφορετικά.

